УДК 550.3;550.215

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТКЛИКА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫХ СРЕДАХ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ. Ч. 2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.В. Астафуров[1], Е.В. Шилько[1], А.В. Димаки[1], В.В. Ружич[2], В.В. Лопатин[3], Б.Г. Шубин[3], В.Л. Попов[4], С.Г. Псахье[1]

[1]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. г. Томск
[2]Институт земной коры СО РАН. г. Иркутск
[3]Научно-исследовательский институт высоких напряжений при ТПУ. г. Томск
[4]Берлинский технический университет. г. Берлин, Германия
E-mail: lopatin@hvd.tpu.ru

Путем компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов проведено теоретическое изучение отклика активных границ раздела структурно-тектонических блоков земной коры (разломов) на вибрационные воздействия и изменение их состояния, реализуемое обводнением. Результаты расчетов подтвердили выводы, сделанные по данным натурных испытаний, а также позволили выявить роль каждого их факторов в изменении характера отклика разлома, что может быть использовано для однозначного объяснения обнаруженных экспериментально эффектов. На основе результатов моделирования и экспериментальных данных разработан конкретный способ реализации предложенного подхода к техногенному управлению режимом смещений в зонах сейсмоактивных разломов, основанный на применении электроразрядных технологий.

Введение

Результаты многолетнего мониторинга смещений по активным разломам и натурных экспериментов демонстрируют принципиальную возможность инициации в высоконапряженных фрагментах активных разломов аномальных по амплитуде смещений в «квазивязком» (криповом) режиме совместным применением водонасыщения и вибрационных воздействий [1, 2]. При этом в процессе трения краев разлома будет иметь место диссипация аккумулированной в земной коре упругой энергии и релаксация локальных напряжений. Полученные результаты позволили предложить идею принципиально нового способа управления режимом смещений во фрагментах сейсмоопасных тектонических разломов путем инициирования смещений в режиме сдвиговой ползучести за счет насыщения жидкостью фрагмента разлома в сочетаниями с циклическими воздействиями на него. При этом необходимо иметь ясное понимание механизмов влияния подобных комплексных воздействий, приводящих к переключению режима смещений берегов разлома. Отметим, что для детального изучения особенностей отклика зон активных разломов в настоящее время активно используется математический аппарат механики деформируемого твердого тела, а также методы компьютерного моделирования.

В течение многих лет при описании деформационных процессов в земной коре в большинстве случаев применялись различные способы осреднения по пространству как свойств среды, так и параметров механического движения, при этом блочное строение не учитывалось в явном виде. При этом специфические свойства нарушений сплошности учитывались либо путем осреднения по пространству, либо посредством расчетов деформирования системы разрывов в сплошной среде с анализом условий на границе раздела. Существенные иногда отклонения от «средних» зависимостей в эксперименте часто приписывались методическим погрешностям. Однако при решении целого класса задач, связанного с локализацией деформационных процессов на структурных нарушениях, оказалось, что даже самые совершенные модели сплошной среды принципиально не могут быть использованы.

Многочисленные литературные данные говорят о том, что земная кора имеет иерархически организованное дискретное блочное строение [3–6], что обеспечивает наличие дополнительных степеней свободы и, как следствие, достаточно высокую деформационную способность среды в целом. В восьмидесятые годы прошлого века, после того как были опубликованы работы академика М.А. Садовского, началось интенсивное развитие исследований, направленных на изучение влияния блокового строения земной коры на различные геофизические процессы. Постепенно в науках о Земле сформировались два различных подхода к проблеме влияния нарушений сплошности на свойства мас-

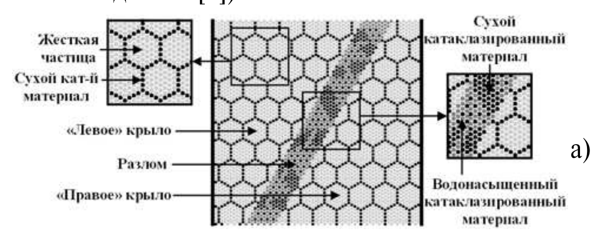
сива скальных пород. Одно направление пытается оценить интегральные эффекты всей совокупности нарушений, расположенных внутри достаточно представительного для рассматриваемой задачи объема [7, 8]. Это позволяет использовать аппарат механики сплошных сред при решении инженерных задач. Другое направление рассматривает нарушения сплошности как отдельные объекты, свойства которых во многом определяют закономерности деформирования блочного массива горных пород [1, 2, 9, 10]. Очевидно, что использование в рамках данного подхода математического аппарата механики сплошных сред встречает ряд принципиальных трудностей. В этой связи более логичным выглядит применение дискретных методов моделирования. Одним из таких методов, является используемый в данной работе метод подвижных клеточных автоматов (английская аббревиатура – MCA). Данный подход предполагает возможность учета (явным и неявным образом) особенностей блочного строения земной коры на разных масштабных уровнях. В последнее десятилетие метод MCA [11, 12] успешно зарекомендовал себя при моделировании отклика таких сложных гетерогенных сред как угольные пласты, сыпучие грунты, спеченные композиционные материалы, геосреды [1, 2, 13–16].

Настоящая статья посвящена анализу основных результатов изучения влияния обводнения и вибрации на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов, полученных путем компьютерного моделирования методом MCA.

Постановка задачи и результаты компьютерного моделирования

Для компьютерного моделирования методом MCA отклика зоны обводненного разлома при вибрационном воздействии была разработана модель участка активного разлома, представленная на рис. 1, *а*. Можно выделить три основных блока рассматриваемой системы: «левое» и «правое» крылья разлома, а также внутриразломная область, механический отклик которой имитирует соответствующие характеристики катаклазированного вещества (раздробленных и перетертых горных пород, спрессованных высокими давлениями). Размеры моделируемой области уменьшены примерно в 50 раз по отношению к средним размерам фрагментов реальных разломов. Учет обводнения разлома проводился путем задания отдельным клеточным автоматам внутриразломного материала механических характеристик водонасыщенного катаклазированного вещества. В рассматриваемой задаче объемная доля таких автоматов составляла около 50 %.

Как видно из рис. 1, *а*, материал крыльев разлома имеет композитную структуру и состоит из жестких частиц (блоков), разделенных прослойками того же состава, что и материал внутри разлома. Такое представление геосреды отражает тот факт, что геоматериалы имеют блочную структуру и состоят из относительно слабо связанных минеральных фаз и зерен [5, 17]. Важно отметить, что подобное представление структуры земной коры правомерно на разных масштабных уровнях описания геологических сред. В этом случае геологическая среда может быть представлена из фрагментов с относительно высокой прочностью, разделенных прослойками материала с отличными физико-механическими (данная модель была предложена академиком РАН С.В. Гольдиным [6]).



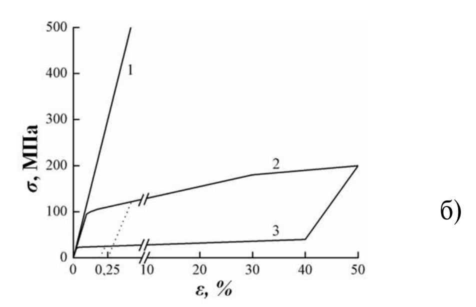


Рис. 1. *а) Структура моделируемого фрагмента разлома; б) функции отклика автоматов жестких частиц (1), «сухого» (2) и «предельно насыщенного» водой (3) катаклазированного материала. Пунктирные линии соответствуют разгрузке*

Используемые в настоящей работе функции отклика подвижных клеточных автоматов для рассматриваемых материалов участка разлома представлены на рис. 1, *б*. Как видно из рисунка, для частиц задавалась линейная функция отклика, отвечающая хрупкому, но высокопрочному материалу (кривая 1). Для катаклазированного материала функция отклика имела длинный необратимый участок (кривая 2).

Учет содержания воды в несвязанном виде в обводненных автоматах внутриразломного материала проводился неявно, путем модификации функции отклика сухого катаклазированного вещества (кривые 2 и 3 на рис. 1, *б*). При этом использовались два основных предположения:

1. Предел упругости материала уменьшается с увеличением содержания воды. Кроме того, при переходе в область необратимых деформаций наличие в материале разлома несвязанной воды приводит к уменьшению наклона функции отклика подвижных автоматов, так как вода играет роль «смазки» между поверхностями многочисленных внутренних несплошностей, снижая коэффициент трения скольжения.
2. В процессе деформирования материала имеет место выдавливание воды в результате «схлопывания» пор, сжатия поверхностей трещин и т.д. В

предельном случае, когда материал спрессован и практически обезвожен, полагается, что его физико-механические характеристики близки к соответствующим значениям для «сухого» материала. Поэтому значения прочности и предельной деформации материала разлома не зависят от степени исходного насыщения водой и равны соответствующим величинам «сухого» материала (необходимо отметить, что водонасыщение породы обычно приводит к снижению ее прочности благодаря эффекту Ребиндера).

Изменение степени исходного насыщения водой учитывалось путем линейного изменения параметров функции отклика между выбранными предельными значениями. В качестве параметра водонасыщенности использовался коэффициент $K=\varepsilon_h^w-\varepsilon_h^0/\varepsilon_h^m-\varepsilon_h^0$, где верхние индексы 0 и *m* обозначают параметры функций отклика «сухого» и «предельно насыщенного» водой материалов, а индекс *w* – материал с текущей степенью насыщения водой *K* (рис. 2). Очевидно, что параметр *K* изменяется в пределах от 0 до 1.

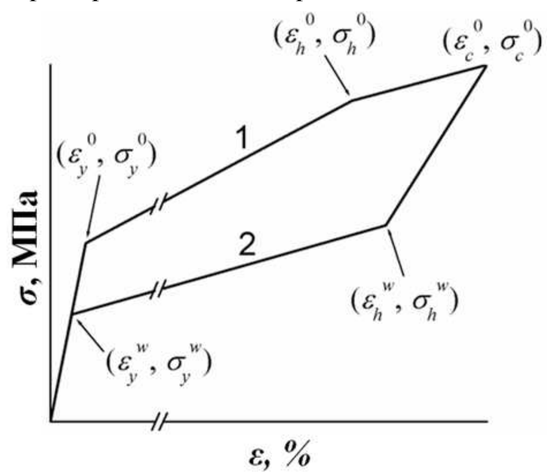


Рис. 2. *Схематическое представление функций отклика «сухого» (1) и насыщенного водой (2) материалов*

Таким образом, функция отклика материала, характеризуемого коэффициентом *K*, имеет следующие параметры:

$$\begin{cases} \sigma_y^w = \sigma_y^0 - K(\sigma_y^0 - \sigma_y^m), \\ \sigma_h^w = \sigma_h^0 - K(\sigma_h^0 - \sigma_h^m), \\ \varepsilon_h^w = \varepsilon_h^0 + K(\varepsilon_h^0 - \varepsilon_h^m), \\ \sigma_c^w = \sigma_c^0, \\ \varepsilon_c^w = \varepsilon_c^0. \end{cases}$$

Важно отметить, что коэффициент *K*, использующийся для задания механических характеристик водонасыщенного материала, хотя и связан с объемным (или массовым) содержанием воды, но не равен ему. Так, значение *K*=1 отвечает некоторой предельной концентрации воды в объеме материала, которая в зависимости от его пористой и дефектной структуры, а также от смачиваемости, может составлять как десятки, так и доли процента (при объемном содержании жидкости порядка десятков процентов необходимо также учитывать зависимость упругих констант материала от ее концентрации). Таким образом, в рамках поставленной задачи проводится только качественный анализ влияния водонасыщенности материала разлома на режим смещений крыльев. Следует отметить, что предложенная модель хотя и является предельно упрощенной, но может быть использована в качестве базовой для изучения особенностей отклика и разрушения подобных сложных сред.

В настоящей работе в качестве функции отклика предельно насыщенных водой (*K*=1) автоматов катаклазированного вещества использовалась модельная кривая 3 на рис. 1, *б*.

Исходное напряженное состояние моделируемого фрагмента разлома достигалось путем его предварительного сжатия с постоянной силой *F*, как показано на схеме (рис. 3, *а*). После достижения в системе силового равновесия задавалось относительное смещение краев разлома путем задания к внешней границе правого крыла скорости *V*, вектор которой направлен параллельно линии разлома (рис. 3, *б*). Внешний край левого крыла фиксировался. Таким образом, правое крыло разлома в данном численном эксперименте являлось активным, а левое – пассивным. Вибрационное воздействие имитировалось периодическим изменением величины скорости нагружения: $V=V_0+V_A\sin(2\pi t\nu)$, где V_0 – постоянное «фоновое» значение, имитирующее естественный ход смещения крыльев разлома, V_A – амплитуда изменения скорости, t – время, ν – частота вибрации.

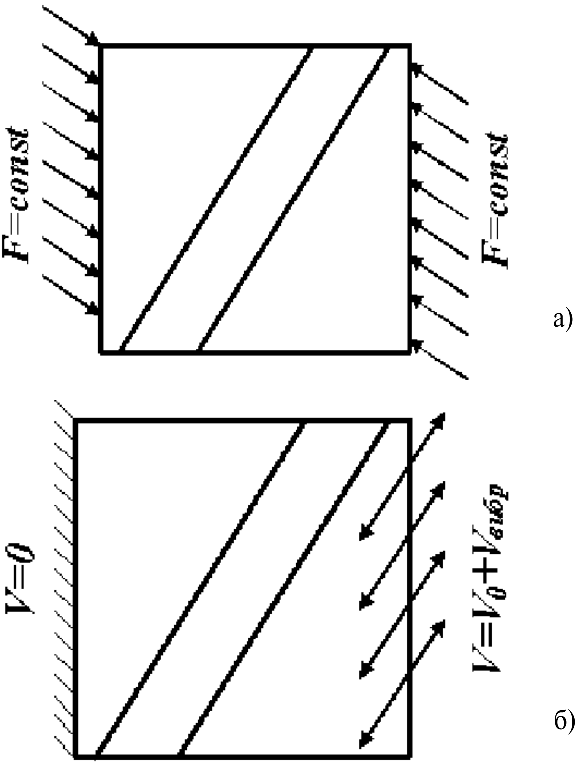


Рис. 3. *Схема нагружения: а) создание исходных напряжений; б) нагружение с постоянной скоростью V_0 + вибрация $V_{вибр}=V_A\sin(2\pi t\nu)$*

В работе рассматривались как необводненный («сухой»), так и насыщенный жидкостью разлом (рис. 1, *а*). Во втором случае полагалось, что «обводненные» автоматы внутриразломного материала предельно насыщены жидкостью (K=1).

Исследовалась зависимость силы сопротивления относительному тангенциальному смещению крыльев разлома F_{resist}^{shear} от величины смещения l_{shear} в режиме движения с постоянной скоростью ($V=V_0$), а также в условиях высокочастотного вибрационного воздействия. В данном случае под термином «высокочастотное» понимается такое периодическое нагружение, частота которого выше максимальной из собственных частот образца $\nu_{\parallel}=V_{\parallel}/2H$, где $V_{\parallel}$ – продольная скорость звука в среде, H – характерный размер образца. Как показано в [1], заметное влияние вибрационного нагружения на отклик модельного разлома наблюдается только в случае, когда частоты вибраций превышают собственные частоты системы. Поэтому в работе использовалось «высокочастотное» вибрационное воздействие (частота вибрации в 1,4 раза превышала собственную частоту модельной системы).

Результаты расчетов показывают, что кривая $F_{resist}^{shear}(l_{shear})$ для необводненного разлома при $V=V_0$ имеет хорошо известный из экспериментов профиль [3] и характеризуется тремя основными стадиями (кривая 1 на рис. 4). Первая стадия соответствует быстрому росту силы сопротивления. Вторая стадия соответствует более плавному росту силы вплоть до некоторого максимального значения. Как показано в [1], это связано, в частности, с генерацией и накоплением повреждений в материале разлома в процессе нагружения системы. На определенной стадии эти повреждения формируют макрокластер, что приводит к резкому уменьшению сцепления крыльев разлома и, как следствие, снижению сопротивления их относительному движению.

Обводнение разлома может приводить к смене режима и характера отклика моделируемой системы. Результаты расчетов показывают, что насыщение жидкостью моделируемого фрагмента разлома приводит к уменьшению силы сопротивления относительному смещению его краев и значительному (в несколько раз) удлинению участка плавного роста силы сопротивления (кривая 2 на рис. 4). При этом пиковое значение силы не только заметно уменьшилось, но и сместилось более чем в 2 раза в сторону больших деформаций. Такая смена характера отклика разлома при обводнении, по-видимому, связана с тем, что жидкость играет роль смазки, снижая эффективный коэффициент трения на границе раздела блоков.

Тот факт, что относительные смещения краев обводненного разлома инициируются при меньших значениях внутренних напряжений может приводить к тому, что закачка жидкости в «сухой» разлом с высоким уровнем локальных напряжений может спровоцировать достаточно большие необратимые смещения. При этом величина и характерная скорость смещений определяются уровнем внутренних напряжений, степенью обводнения и, безусловно, спецификой внутреннего строения самого разлома.

Высокочастотное циклическое воздействие принципиально меняет характер отклика обводненного разлома. Так, стадия медленного роста (кривая 2 на рис. 4) трансформируется в достаточно протяженное плато, на котором среднее значение силы сопротивления (с учетом осцилляций) изменяется слабо (не более 10 %) (кривая 3 на рис. 4). Таким образом, на данной стадии (при достижении точки А на кривой 3) смещение краев разлома возможно без существенного увеличения нагрузки. При этом слабые колебания силы сопротивления на плато могут приводить к небольшим «разгонам» и «торможениям» активного крыла.

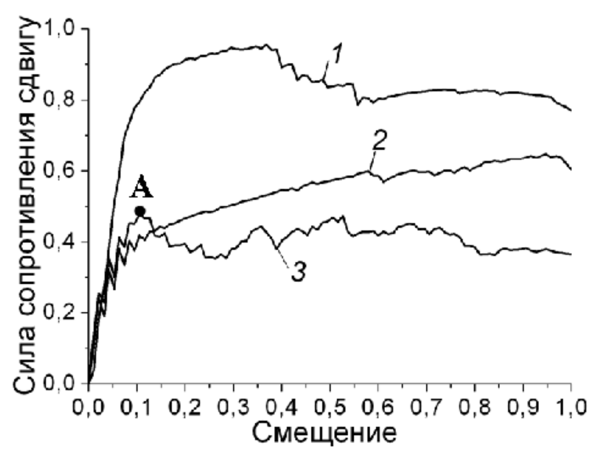


Рис. 4. *Зависимость нормированной силы сопротивления сдвигу крыльев разлома от нормированного смещения: 1) K=0, без вибрации; 2) K=1, без вибрации; 3) K=1, с вибрацией ($V_A=2\times V_0$)*

Таким образом, совместным использованием насыщения фрагмента зоны разлома жидкостью и вибрационного воздействия можно направленным образом инициировать смещения по разлому в квазивязком режиме. Смена режима смещений может в значительной степени изменить локальный процесс релаксации внутренних напряжений в рассматриваемой области геосреды. При этом становится возможным переход от режима одиночных актов высвобождения большого количества упругой энергии к ее многократному выделению относительно небольшими долями.

Обсуждение результатов

Результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований показывают возможность целенаправленного изменения режима смещений в зонах сейсмоактивных разломов. Необходимо отметить, что основной целью проводимых работ была разработка методов управления режимом смещений в зонах сейсмоактивных разломов с целью релаксации локальных напряжений и снижения опасности возникновения сильных землетрясений. Поэтому, помимо комплексного исследования влияния об-

воднения и динамических воздействий на границы раздела в геологических средах, необходимо разрабатывать и новое оборудование для эффективного воздействия на зоны активных разломов.

Источниками возбуждения периодических колебаний в геосреде могут служить серии взрывов ВВ в скважинах (как сухих, так и заполненных водой) или различного типа вибраторы, располагающиеся на поверхности грунта (источником колебаний при этом служит жесткая металлическая плита). Данные методы имеют целый ряд недостатков. Так, в случае проведения взрывных работ происходит разрушение скважин, что существенно снижает возможность многократного повторения воздействия. Наземные вибраторы имеют низкий КПД, так как создаваемые ими возмущения достаточно быстро затухают в геосреде.

Известно также большое количество скважных источников периодических возмущений, в которых используются различные способы возбуждения сигнала. Среди них: разовое использование ВВ, размещение в скважине баков с жидким или газообразным горючим, формирование взрывчатой смеси непосредственно в скважине путем электролиза воды, воздушно-газовые пушки, ударные механизмы и т.д. Недостатками этих устройств являются низкая мощность источников, малая интенсивность возбуждаемых волн, а также необходимость поднятия на поверхность устройства для снаряжения при последующих воздействиях [18].

Более перспективным нам представляется применение электроразрядных вибраторов, в которых источником возмущений является расширяющаяся плазма импульсного разрядного канала в воде или в горной породе, а впоследствии – пульсирующий паро-плазменный пузырь, образующийся при распаде плазмы. Подобный подход, основанный на электрогидравлическом [19] и электроимпульсном [20] эффектах, используется в технологиях дробления материалов, бурения и декольматации скважин, очистки труб, отливок и т.д. от отложений (скейлинг) и др.

Простейший электроразрядный вибратор с набором регулируемых частот представляет собой искровой разрядник с определенной геометрией электродов и межэлектродным промежутком, находящемся в заполненной водой скважине вблизи плоскости разлома. Такой разрядник является источником гидроакустических возмущений, энергия которых будет частично передаваться разгружаемым структурным элементам земной коры через плоскость разлома.

Электроразрядный вибратор может генерировать волны давления с широким спектром частот. Вначале источником гидроакустических волн являются развивающиеся со скоростью до 10^7 см/с разрядные каналы, точнее граница фазового перехода жидкость-плазма. Давление на фронте этих сверхзвуковых волн достигает 10^9 Па [21], постоянная времени $\tau_1 \sim 10^{-7}$ с, однако они быстро диссипируют. Основная часть энергии уносится ударной волной после замыкания разрядным каналом промежутка и его расширения при протекании разрядного тока импульсного генератора. Постоянная времени этого процесса $\tau_2 \sim 10^{-5}$ с. Амплитуда давления $P_к$ определяется мощностью энерговыделения в плазме, т.е. энергией и соотношением импеданса генератора и сопротивления разрядного канала. Ее величина обычно составляет $10^8...10^{10}$ Па. Третья, низкочастотная ($\tau_3 \sim 10^{-2}$ с) компонента генерируется пульсирующим пароплазменным пузырем, образующимся из продуктов распада разрядного канала. Давление акустических волн сжатия $P_п$ обычно $\sim 10^6$ Па, а волн растяжения, возникающих при сжатии пузыря, около $5 \cdot 10^4$ Па. Амплитуда давления акустических и ударных волн пропорциональна мощности энерговыделения в разрядном канале, которая максимальна при согласованном режиме работы импульсного высоковольтного генератора с импедансом $Z = \sqrt{L/C}$ (L и C – индуктивность и емкость генератора) и сопротивлением канала R_k, (т.е. $Z \cong R_k$). Результаты расчетов амплитуды давления $P_к$ на стенке расширяющегося плазменного канала и на стенке пульсирующего пароплазменного пузыря для согласованного режима приведены на рис. 5. Для реализации такого режима спроектирован генератор гидроакустических возмущений, представляющий собой батарею конденсаторов с емкостью $C = 3 \cdot 10^{-5}$ Ф, коммутируемую через линию псевдоискровыми газовыми разрядниками на водяной разрядник-вибратор в скважине. Период генерации возмущений может регулироваться от 0,1 до 100 с, рис. 5. Энергия импульса при напряжении 45 кВ составляет 30 кДж, что даже в случае полного выделения энергии в канале разряда соответствует энергии 3 г ВВ [22].

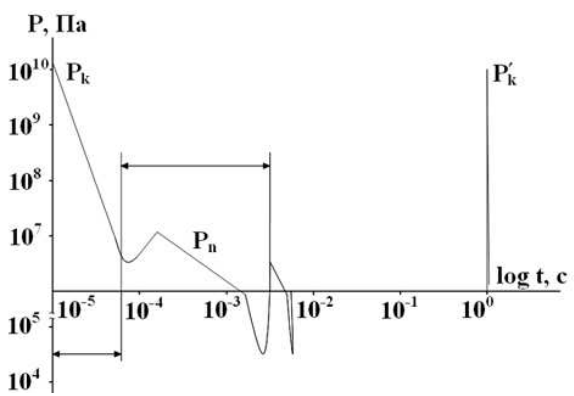


Рис. 5. *Стилизованная картина давления P_k в канале разряда и P_n в парогазовой полости. P'_k – давление от следующего разряда*

Электроразрядный вибратор может возмущать исследуемый фрагмент зоны разлома в течение минут, часов, суток и, несмотря на сравнительно невысокую энергию возмущений, способен поддерживать движение блоков в квазивязком режиме.

Следует особо отметить большую эффективность такого рода воздействий на обводненную зону разлома. Действительно, инициированная в наполненной жидкостью скважине волна сжатия-разрежения будет эффективно распространяться через

заполненные жидкостью каналы трещинно-поровой геосреды. Это приведет к «объемному» воздействию на материал, составляющий зону разлома, со стороны жидкости, содержащейся в несплошностях, в достаточно большом радиусе действия.

Заключение и благодарности

В настоящей работе проведено теоретическое изучение отклика границ раздела структурно-тектонических блоков земной коры (разломов) на вибрационные воздействия и изменение их состояния, реализуемое обводнением (факторов, воздействие которых постоянно происходит в результате естественных процессов в земной коре и атмосфере, а также может быть реализовано искусственно). Для этого в рамках метода численного моделирования МСА была построена базовая структурная модель фрагмента активного разлома. Результаты расчетов показали, в частности, что обводнение зоны разлома с высоким уровнем внутренних напряжений может спровоцировать достаточно большие необратимые смещения, величина и скорость которых определяются уровнем внутренних напряжений и строением зоны разлома. При этом «высокочастотное» вибрационное воздействие на обводненную зону разлома может приводить к инициации аномальных по величине, но плавных смещений геоблоков без выделения мощных сейсмических импульсов. Фактически это означает выделение части избыточной упругой энергии земной коры сейсмически безопасным способом и локальное снижение напряжений. Проведенные здесь расчеты не только подтвердили результаты натурных испытаний, изложенные в первой части статьи, но и позволили лучше понять причины обнаруженных эффектов. Таким образом, теоретически и экспериментально продемонстрированная эффективность комбинированного применения обводнения высоконапряженных фрагментов активных разломов и вибраций открывает возможности направленного изменения напряженно-деформированного состояния геосред.

Полученные результаты изучения влияния вибраций и обводнения позволили предложить новый подход к локальному воздействию на высоконапряженные участки зон разломов, основанный на использовании серий взрывов малой мощности (до нескольких грамм тротила) в обводненном разломе. Такие взрывы могут быть реализованы применением электроразрядных технологий. Полное время выделения энергии (пульсации канала разряда) в ходе одного цикла воздействия не превышает 10^{-3} с, что на 2–3 порядка меньше времен, связанных с собственными частотами разломных блоков. Это гарантирует эффективность предложенного способа инициации вибрационных воздействий в качестве источника накачки локальных необратимых деформаций в зонах разломов. Отметим, что реализации данной методики должно предшествовать детальное изучение структуры, состояния и степени активности зоны разлома.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 04-05-64707) и президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-2324.2003.1), грантов конкурсов экспедиционных работ СО РАН 2003-2005 годов, а также гранта Министерства образования и науки РФ и CRDF в рамках программы BRHE (проект № 016-02).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // Физ. мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 41–53.
2. Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др. Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // Физ. мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 23–30.
3. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
4. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
5. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–831.
6. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 5–22.
7. White J.E. Underground sound. – Amsterdam-Oxford-N.Y.: Elsevier, 1983. – 218 p.
8. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. – М.: Наука, 1990. – 198 с.
9. Костюченко В.Н. О прохождении сейсмических волн через массив трещиноватых горных пород // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 285. – № 2. – С. 45–49.
10. Kocharyan G.G., Kostyuchenko V.N., Pavlov D.V. Structure of various scale natural rock discontinuities and their deformation properties // Int. J. of Roch Mech. & Min. Sci. – 1997. – V. 34. – № 3/4. – P. 529–533.
11. Psakhie S.G., Horie Y., Ostermeyer G.P. e.a. Movable cellular automata method for simulating materials with mesostructure // Theor. and App. Fr. Mech. – 2001. – V. 37. – № 1–3. – P. 311–334.
12. Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Шилько Е.В. и др. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физ. мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 5–15.
13. Psakhie S.G., Zavshek S., Jezershek J. e.a. Computer-aided examination and forecast of strength properties of heterogeneous coal-beds // Computational material science. – 2000. – V. 19. – № 1–4. – P. 69–76.
14. Гольдин С.В., Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Юшин В.И. Переупаковка структуры и возникновение подъемной силы при динамическом нагружении сыпучих грунтов // Физ. мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 3. – С. 97–103.
15. Псахье С.Г., Ружич В.В., Смекалин О.П., Шилько Е.В. Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях // Физ. мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 67–71.
16. Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Shilko E.V., Psakhie S.G. About nature of «slow-waves» and initiation of displacements at fault regions // Proc. of the Intern. Conf. on New Challenges in Mesomechanics. – 2002. – V. 1. – P. 311–318.

17. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических горных пород. Атлас в 2 томах. – М.: Недра, 1966.
18. Кочарян Г.Г., Будков А.М., Виноградов Е.А. и др. Сейсмический эффект детонации воздушно-топливной смеси в скважине // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 3. – С. 32–46.
19. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1986. – 253 с.
20. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – М.: Изд-во РАН, 1995. – 276 с.
21. Gavrilov I.M., Kukhta V.R., Lopatin V.V. Dynamics of Breakdown Phenomena in Nonuniform fields in Water // IEEE Transactions on Dielectric and Electr. Insul. – 1994. – V. 1. – № 3. – P. 496–502.
22. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 154 с.

УДК 622.24